

半导体热敏电阻的电阻—温度特性

实验原理

1. 半导体热敏电阻的电阻—温度特性

某些金属氧化物半导体（如： Fe_3O_4 、 MgCr_2O_4 等）的电阻与温度的关系满足式（1）：

$$R_T = R_\infty e^{\frac{B}{T}} \quad (1)$$

式中 R_T 是温度为 T 时的热敏电阻阻值， R_∞ 是 T 趋于无穷时热敏电阻的阻值^①， B 是热敏电阻的材料常数， T 为热力学温度。

热敏电阻对温度变化反应的灵敏度一般由电阻温度系数 α 来表示。根据定义，电阻温度系数可由式（2）来决定：

$$\alpha = \frac{1}{R_T} \frac{dR_T}{dT} \quad (2)$$

由于这类热敏电阻的 α 值为负，因此被称为负温度系数（NTC）热敏电阻，这也是最常见的一类热敏电阻。

2. 惠斯通电桥的工作原理

半导体热敏电阻的工作阻值范围一般在 $1 \sim 10^6 \Omega$ ，需要较精确测量时常用电桥法，惠斯通电桥是一种应用很广泛的仪器。

惠斯通电桥的原理如图 1 所示。四个电阻 R_0 、 R_1 、 R_2 和 R_x 组成一个四边形，其中 R_x 就是待测电阻。在四边形的一对对角 A 和 C 之间连接电源；而在另一对对角 B 和 D 之间接入检流计 G。当 B 和 D 两点电势相等时，G 中无电流通过，电桥便达到了平衡。平衡时必须

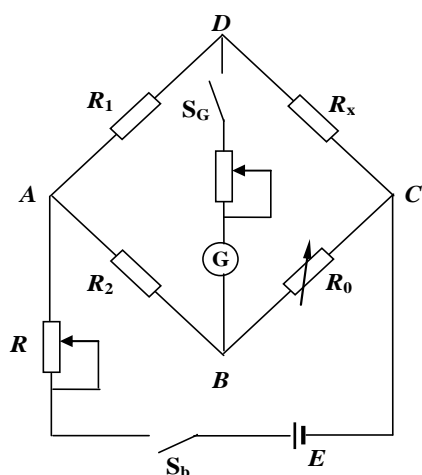


图 1 惠斯通电桥原理图

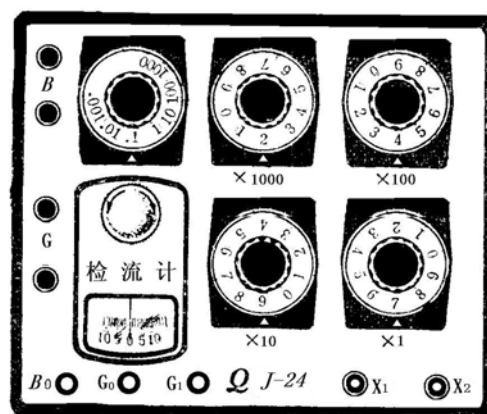


图 2 惠斯通电桥面板图

^① 由于(1)式只在某一温度范围内才适用，所以更确切的说 R_∞ 仅是公式的一个系数，而并非实际 T 趋于无穷时热敏电阻的阻值。

有 $R_x = \frac{R_1}{R_2} R_0$ ， $\frac{R_1}{R_2}$ 和 R_0 都已知， R_x 即可求出。 R_0 为标准可变电阻，由有四个旋钮的电

阻箱组成，最小改变量为 $1\ \Omega$ 。 $\frac{R_1}{R_2}$ 称电桥的比率臂，由一个旋钮调节，它采用十进制固定

值，共分 0.001, 0.01, 0.1, 1, 10, 100, 1000 七挡。测量时应选择合适的挡位，保证测量值有 4 位有效数。电桥一般自带检流计，如图 2 所示，如果有特殊的精度要求也可外接检流计，本实验采用外接的检流计来判断电桥的平衡。

实验内容

1. 数据测量

打开大学物理仿真实验软件，在实验目录中选择“热敏电阻”进入本实验主页面。在实验桌上点击各仿真实验仪器（包括：功率调节器、电炉及热敏电阻、惠斯通电桥、检流计和稳压电源）和说明书，进入相关页面并按照说明了解仪器型号、使用方法及基本性能，对于实验仪器上的所有调节旋钮，其调节方法均为点击鼠标左键反时针转，点击鼠标右键顺时针转。

熟悉各实验仪器的使用后，点击“连接导线”进入相关页面，按图 3 接线，其中功率调节器和电炉之间已经连接，不需要再用导线去连。连线正确后点击“开始测量数据”按钮进入测量页面。

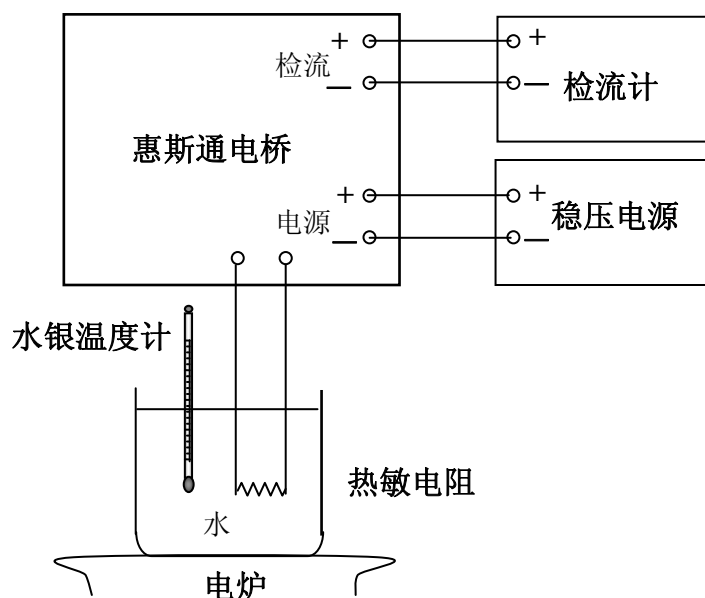


图 3 仪器连接图

首先，打开稳压电源，根据惠斯通电桥的额定工作电压选择稳压电源的输出电压。打开检流计使其进入工作状态（即解除检流计的锁定），按“短路”按钮，观察检流计指针是否指零，如果指针未指零，则旋转“零位调节”旋钮调零。之后按下“电计”按钮，将检流计接入电路，由于此时电桥还未调节平衡，所以检流计指针会偏到一边，若电桥平衡时，则检流计指针应指零。

接着，点击惠斯通电桥进入电阻测量页面，测量室温（20.0℃）时热敏电阻的阻值。测量时，保持温度计、检流计和记录本页面处于打开状态，选择合适的倍率值（使测量的电阻

值有 4 位有效数), 调节电阻箱阻值使按下“电计”按钮时, 检流计指针指零。此时按右下角的“数据记录”按钮便可将温度计所显示温度 (20.0℃) 时的电阻值记录下来。**注意:** 由于此时电炉还未通电, 温度会保持 20.0℃不变, 所以请用足够的时间来熟悉惠斯通电桥的电阻调节方法, 以便在下一步变温测量时能迅速正确的测量电阻值。本实验采用的热敏电阻在 20.0℃时的阻值约为 500.0 Ω。

然后, 打开功率调节器, 不断调节合适的功率值, 使电炉开始给水浴加热从而改变热敏电阻的阻值。用惠斯通电桥从 25.0℃开始每隔 5.0℃测量一次电阻值, 直到 85.0℃。之后, 逐渐调小并最终关闭功率调节器, 使水浴慢慢冷却, 测量降温过程中, 各对应温度点的电阻值。**注意:** 由于仿真实验考虑了电功率和散热因素, 所以功率过高则升温过快, 来不及记录数据; 功率过低则升温过慢, 浪费时间, 甚至可能达不到预订的温度。建议升温时按实际情况逐步提高功率。降温时也不要立刻关闭电源, 而是通过逐渐降低功率来控制降温速度。测量过程中多注意温度计读数, 并及时调节电桥让指针始终靠近零刻度线, 以免电桥远离平衡, 到时来不及调节而错过测量要求温度的电阻值。

2. 数据处理

2.1 数据表格

在 Excel 中建立以下数据表格, 将测量得到的原始数据 ($t, R_{\text{升温}}, R_{\text{降温}}$) 填入数据表格并计算相应的 $T, R_{\text{平均}}, \ln R, 1/T$, 如表 1 所示。在 D 盘根目录下新建文件夹, 文件名为: 学号和姓名, 如“09005516 张强”。把填好的 Excel 表格以相同的文件名命名后保存到以上文件夹中。填写表格时请注意有效数字的保留。

热敏电阻实验数据记录表						
$t/^{\circ}\text{C}$	T/K	$R_{\text{升温}}/\Omega$	$R_{\text{降温}}/\Omega$	$R_{\text{平均}}/\Omega$	$\ln R$	$1/T(\times 10^{-3})$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots

表 1

2.2 直线拟合 (一元线性回归) 法求 B, R_{∞}

对于一系列实验数据 (x_i, y_i) ($i = 1, 2, \dots, n$), 若 x 与 y 存在线性关系, 则一元线性回归方程可设为:

$$y = a + bx \tag{3}$$

通过最小二乘法^①可计算得到该线性方程的截距 a 和斜率 b 。


对 (1) 式两边求自然对数后可得到 $\ln R_T$ 和 $\frac{1}{T}$ 的线性关系式:

^① 钱锋, 潘人培. 大学物理实验 (修订版). 北京: 高等教育出版社, 2005. 21~23

$$\ln R_T = \ln R_\infty + B \frac{1}{T} \quad (4)$$


于是通过最小二乘法计算便可得到 $\ln R_\infty$ 和 B 的值。本实验借助图形可视化和数据分析软件 Origin，利用最小二乘原理来完成对实验数据的直线拟合，具体步骤如下：

① 打开 Origin 软件，用选择菜单命令“File”→“Open Excel”选择上面保存的 Excel 文件，在弹出的打开 Excel 工作簿单选框中选择“Open as Excel Workbook”将 Origin 工作表中的数据与 Excel 工作簿数据源关联起来。

② 点击界面左下角的“Scatter”图标 ，出现“Select Data for Plotting”对话框。选中 Excel 工作簿中的“ $1/T(\times 10^{-3})$ ”列，然后单击该对话框中的图标 X；选中 Excel 工作簿中的“ $\ln R$ ”列，然后单击该对话框中的图标 Y。最后单击“Plot”按钮，即可把数据点以散点图的形式绘制在二维坐标平面上。

③ 选择菜单命令“Analysis”→“Fit Linear”，进行拟合，其拟合直线在散点图上绘出，同时拟合结果在结果记录“Results Log”窗口（位于界面右下角）中给出。修改横坐标、纵坐标和图例窗口的名称，并调整相应的字体和线宽后，选择菜单命令“File”→“Export Page”，将图片命名为“Linear Fit”，以.bmp 格式保存到上面建立的文件夹中。记录 $\ln R_\infty$ 和 B 的值，根据误差（Error 值）确定其有效数字保留位数，并计算 R_∞ 。**注意：**由于线性拟合时把横坐标值扩大了 1000 倍，所以应把计算给出的 B 值扩大 1000 倍才是最终结果。

2.3 绘制电阻温度曲线并计算 α

把上一步计算得到的 R_∞ 和 B 值代入（1）式，就可以得到 R_T 关于 T 的函数关系式 $R_T = f(T)$ 。在 Origin 主界面左上角工具栏点击“New Function”图标 ，打开“Function Graph”窗口和“Plot Details”对话框。在“Function”选项卡的 Fn(x) 文本框中键入 R_T 关于 T 的函数关系式，如“ $0.00164 \cdot \exp(4710/x)$ ”。取消默认选择的“Auto X Range”复选框，在出现的横坐标范围文本框中填写热力学温度 T 变化的范围，注意和实际测量的温度变化范围保持一致。在“Line”选项卡上选择线宽和颜色，最后点击“OK”按钮便能在“Function Graph”窗口中绘制出 $R_T = f(T)$ 的函数图线，按“Rescale”按钮调整页面，并修改横坐标、纵坐标和图例窗口的名称，然后选择菜单命令“File”→“Export Page”，将图片命名为“R_T”，以.bmp 格式保存到上面建立的文件夹中。

由（1），（2）两式可得到 α 关于 T 的函数关系式 $\alpha = f(T)$ 。用同上的方法绘制出函数图线，并导出“Alpha_T.bmp”文件保存于自己的文件夹中。

关闭 Origin 软件，把整个 Project 保存到自己建立的文件夹中，命名为“学号姓名.opj”。

最后完成实验报告，包括实验名称，实验人姓名学号、实验日期、仪器名称和型号、实验原理、实验步骤、数据表格、数据处理（只需把计算机处理结果整理并记录下来，如有条件的同学可将以上三幅图线打印后粘帖在报告册上）、实验结果及问题讨论等。

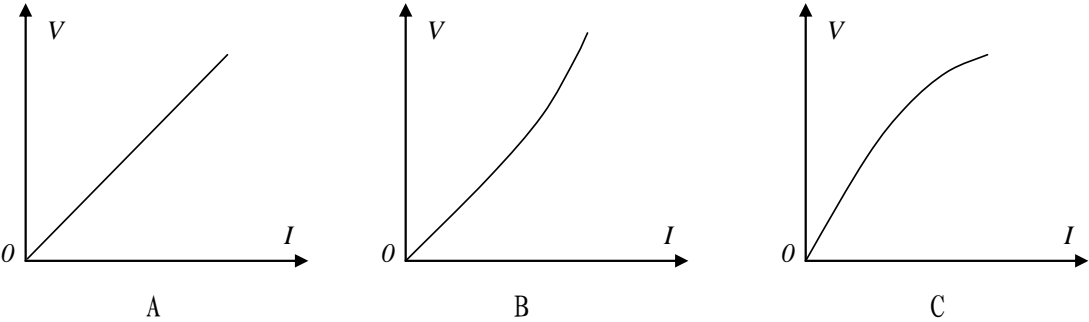
2.4 非线性拟合法求 R_{∞} （选做）

对于一些实验数据，如果能判断或猜测出相应的函数表达式（一般为非线性关系），在某些情况下也可以通过最小二乘原理进行非线性拟合，如果发现拟合的函数曲线和实验数据普遍符合的比较好，那我们便得到了一个经验公式，虽然这类公式并不是通过严谨的理论推导得来，但照样能广泛的应用于各个领域，这在工程上是很常见的。^①

对于本实验测量的数据，我们也可以使用 Origin 软件通过最小二乘原理直接对 $R_{\text{平均}}$ 和 T 进行非线性拟合。用和实验内容 2 中①②相同的方法绘制表 1 中 $R_{\text{平均}}$ 和 T 的散点图。选择菜单命令“Analysis”→“Non-linear Curve Fit”→“Advanced Fitting Tool...”，在弹出的对话框中选择自定义函数，输入拟合函数 $y=P1*\exp(P2/x)$ ，并进行相关设置，最终拟合得到曲线和系数。将拟合结果与前面的结果比较，并保存相应曲线图。

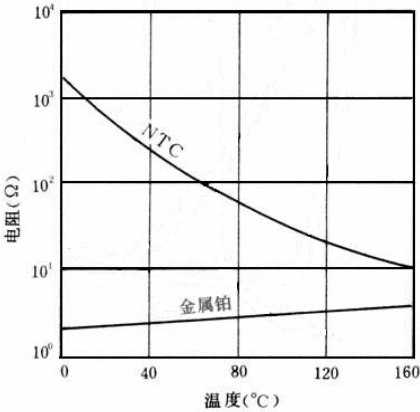
问题与思考

(1) 结合本实验内容，想一想，如果测量热敏电阻的伏安特性曲线，则其曲线的形状应接近于下列的哪一幅图？为什么？



(2) 右图为金属电阻和热敏电阻（NTC）的电阻温度特性曲线，试比较两者的不同点。并说明常温下，哪种材料更适合制作测温和温控器件，为什么？

(3) 若提供热敏电阻、微安表、电阻箱、电阻器、电池、开关、导线、万用表和恒温水浴等仪器和元件，请设计方案制作一台测温范围在 20°C ~ 70°C 的半导体温度计。（课题实验）



^① 本实验中的 (1) 式就是一个经验公式。